冰冻圈人文社会学的重要视角：功能与服务

效存德[1*]　王晓明[2]　苏　勃[1]

1 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室 北京 100875

2 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 兰州 730000

摘要　冰冻圈与人类社会（人类圈）息息相关，随着全球变暖和冰冻圈普遍退缩，冰冻圈对人类社会的致利和致灾效应均在发生深刻的变化：一方面，冰冻圈灾害以频发的极端事件加剧呈现；另一方面，冰冻圈服务能力整体将不断减弱乃至丧失。文章在介绍冰冻圈核心区及其主要影响区域的人文社会特征基础上，对冰冻圈功能与服务及其价值理论进行论述，并以全球高山“水塔”的重要性和极地系统变化为例阐述冰冻圈功能和服务变化及其影响，最后进一步讨论了提升冰冻圈影响区社会生态-系统恢复力的路径。

关键词　冰冻圈人文社会学，冰冻圈功能，冰冻圈服务，全球水塔，极地系统，服务价值，恢复力

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200225003

冰冻圈是地球系统中水体处于冻结状态的负温圈层，包括山地冰川和极地冰盖、多年冻土和季节冻土、积雪、海/河/湖冰、冰架、冰山和大气中的冻结状水体等要素，主要分布在地球两极和高山地区[1,2]。冰冻圈作为气候系统五大圈层之一，在气候系统和气候变化中扮演着重要角色；冰冻圈还是地球表层环境的重要组成部分，与人类社会之间长期存在着紧密联系[3,4]。近几十年来，随着全球变暖，以及在可持续发展理念的推动下，冰冻圈科学快速发展，科学内涵不断丰富，其研究内容不仅包含冰冻圈各要素的形成、演化过程与内在机理，以及冰冻圈与气候系统其他圈层的相互作用，还不断拓展到冰冻圈对人类社会的影响和适应等自然和人文学科交叉领域[1,2]。

人类演化与进步从来伴随着冰与雪，一路风霜，坚韧走来。回首人类进化、迁徙及长期社会经济变革的漫长过程，冰冻圈都起到了重要的作用。早期人类得以远程迁徙，部分原因是冰冻圈以冰桥形式提供了交通通道服务；同时，冰冻圈在冰期期间通过调节全球水量分配，使大量海水固定于陆地，海平面大幅下降，导致白令海陆桥和东南亚陆桥的出露，从而使现

*通讯作者

资助项目：国家自然科学基金（41671058、41690145、41690141）

修改稿收到日期：2020年3月27日

代智人从非洲和欧亚大陆走出后，向美洲和大洋洲的迁徙成为可能，促进了智人的全球传播。

2015 年，中国科学家率先提出冰冻圈功能和服务理论框架，系统研究冰冻圈为人类社会带来的直接或间接的、物质性或非物质性的惠益[3,4]。例如，冰冻圈长期为人类提供重要的气候调节服务，一方面营造了地球适宜的气候条件，使温带成为人类文明发达区和发展速度最快的地区；另一方面气候的冷暖交替也促进了人类对大自然的适应能力，客观上促进了人类社会的进步与发展。冰冻圈还为广大寒区旱区居民生产生活提供了宝贵的淡水资源。特别是在以青藏高原为核心的亚洲高海拔地区，冰冻圈水资源非常丰富，是孕育中华文明、印度文明和两河文明的长江、黄河、恒河、印度河、底格里斯河和幼发拉底河等亚洲大江大河的发源地。在冰冻圈及其影响区域，与冰川、雪山等相关的宗教/图腾等形成了独特的文化形态，成为世界文化多样性的重要组成部分。

冰冻圈服务是在冰冻圈功能基础上，赋予人类需求和价值取向，即冰冻圈满足人类物质或精神需要并为人类福祉作出的各种贡献，是通过人类对冰冻圈资源的需求以及资源对人类的效用改善人类福祉的过程（图1）[4,5]。人们希望可以建立最大化和最优化途径，充分、可持续地利用冰冻圈服务以造福人类。与冰冻圈服务相对应，冰冻圈也给人类社会带来很多负面影响，其致灾效应包括因所有冰冻圈要素变化引起的对人类社会和经济发展的损害，如山洪、冰川泥石流、风雪流、雪崩/冰崩、冰川跃动、冻胀与融沉等[6,7]。冰冻圈致灾效应揭示了人类对冰冻圈灾害的暴露度和脆弱性，以及由此而引起的灾害风险（图1）。人们希望建立风险最小化途径，以避免潜在的社会、环境和经济负面影响。

冰冻圈对人类社会的影响与冰冻圈变化过程密切相关。随着全球变暖和冰冻圈加速退缩，冰冻圈功能及其服务在一些地区已经呈现减弱迹象，预估这种情况可能继续加剧，从而导致冰冻圈功能进一步的衰退和丧失（图1）；同时，由于冰冻圈融化伴随着释能、释水和释碳等极端或异常过程，引发的冰冻圈灾害也呈加剧态势，加之冰冻圈及其影响区域人口和经济体量较以往越来越大，这些过程对人类社会的致灾影响正在产生重大而深刻的变化[6]。与频发、显见的冰冻圈灾害相比，冰冻圈致利功能的减退和丧失过程较为漫长，但很有可能导致不可逆后果，需要特别关注。

冰冻圈人文社会学旨在阐释冰冻圈和人类社会的关系，刻画冰冻圈及其影响区域的社会、经济、文化和政治等属性，采用人文社会学（主要是社会学和经济学）的视角和分析手段，揭示和量化冰冻圈变化对人类社会的现实和潜在影响。通过客观预判冰冻圈灾害和冰冻圈功能及其服务衰退带来的影响和风险，尽可能找到风险最小化、服务最大和最优化，以及区域社会-生态系统适应、恢复和转型的路径，从而为冰冻圈及其影响区域的可持续发展决策提供依据。本文在分析冰冻圈影响区人文社会特征的基础上，着重就冰冻圈服务相关内容进行论述。

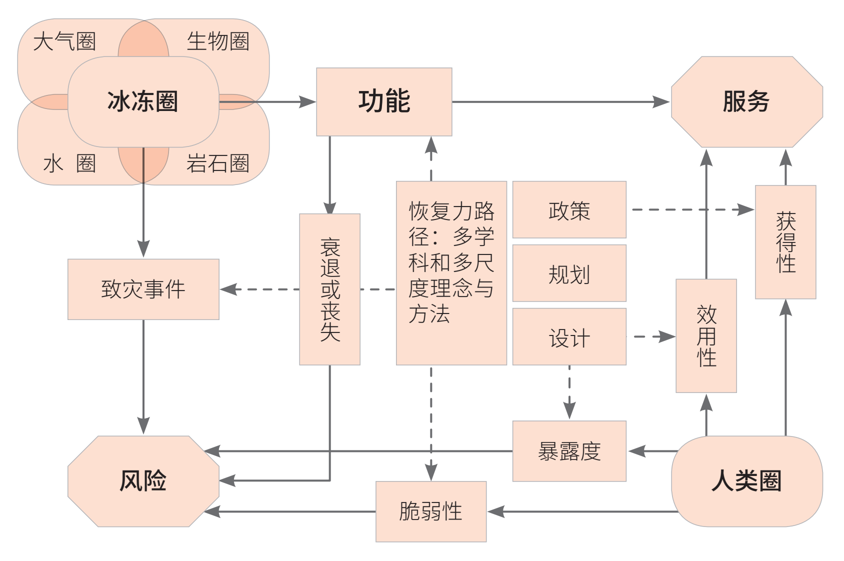


图 1　冰冻圈与人类社会的关系示意图[6]

1 全球冰冻圈核心区及其主要影响区域的人文社会特征

全球冰冻圈主要分布在高纬度的南、北极地区和中低纬度的高山地区，但冰冻圈对社会经济的影响不只局限于冰冻圈核心区内，其相关过程还会辐射到冰冻圈外围地区（即冰冻圈影响区）。冰冻圈核心区总体上环境恶劣，人口相对较少，经济产业相对原始、单一，交通和信息落后；部分区域还长期是公共疆/海域，相对封闭独立，形成了多种多样的民族和宗教语言文化，以及独具特色的法律体系和民族区域自治制度。冰冻圈影响范围可从局地、区域延伸到全球；其主要影响区域，如全球海岸带地区和一些大江大河的下游地区，社会经济文化发展水平较高，甚至成为一些国家或地区的政治经济文化中心。

（1）两极地区。北极地区横跨俄罗斯、加拿大、美国阿拉斯加、冰岛、丹麦格陵兰、瑞典、芬兰、挪威，永久居民约400万；其中，原住民占10%，涵盖20多个民族[8]。冰冻圈原住民世代生活在冰冻圈区，在冰上捕猎获取食物，因纽特人还居住在圆顶冰屋，这种独特的生存模式和生活习俗，以及由此产生的社会经济结构与冰冻圈环境密切相关。随着冰冻圈环境的变化，以及交通网络的改善和外来文化的进入，近年来北极地区传统社会经济文化不断遭受冲击，人口数量逐渐下降、老龄化程度加重。南极地区终年被巨大冰盖覆盖，无人定居于此，是地缘政治的敏感地区，也是科学研究和探险的理想场所。目前，来自全球的南极科学考察队员人数在每年冬夏间可达到1 100—4 400人。

（2）全球高山地区。全球高山地区被誉为“水塔”，这与区域冰川、冻土和积雪提供的水资源密切相关。这些“水塔”在全球水循环中扮演着极其重要的角色，确保了高山地区及其下游地区大量的自然和人类用水需求[3,4,9]。历史上人类依水而居，形成了独特的流域社会经济文化形态，这与冰冻圈融水供给密切相关，在中亚等干旱内陆地区表现尤为明显。目前，全球分别有2.5亿人和16亿人（约占全球的22%）居住在全球高山地区和其下游地区，国内生产总值（GDP）则分别占到全球的4%和18%，高山地区的冰冻圈水资源对相关流域社会、经济发展起着举足轻重的作用。高山地区冰冻圈也为冰雪旅游产业的发展提供了得天独厚的优越条件。例如，阿尔卑斯山冰冻圈旅游发展已经相对成熟。此外，世界上较多雪山及其融水补给的湖泊、河流和孕育的动、植物还为一些宗教和信仰提供了自然载体，对当地社会的文化结构产生了深刻影响[8,10]。

（3）全球海岸带和岛屿等低洼地区。该区域是全球冰冻圈通过影响海平面升降而间接影响的地区。这些地区人口规模大，特别是海岸带地区是当前人口密度最大的地区，全球28%的人口（约19亿）生活在距离海岸线不到100 km、海拔不到100 m的沿海低地，人口超过500万的大城市中有17个也分布于该区域。由于山地冰川和极地冰盖退缩，以及海洋热膨胀等因素影响，海岸带地区社会-生态系统正在并将持续受到海平面上升及相关极端天气事件的威胁[8]。

2 冰冻圈功能、服务与人类福祉

2.1 基本概念

冰冻圈功能包括能量转换、物质（尤其是水体）储存与迁移、承载、天然冷能储存与释放、地表侵蚀或固结等内容，这些功能独立存在于自然界中，均是冰冻圈的自然属性。冰冻圈服务指冰冻圈能够为人类社会提供的各种惠益。水体处于冻结状态是冰冻圈区别于其他圈层或其他环境要素的主要特性；冰冻圈过程反映了冰冻圈自身变化及其与其他圈层的相互作用。冰冻圈具有服务能力是由其特定的功能决定的，是冰冻圈自身环境特性和冰冻圈独特的结构和过程综合作用的结果[3,4]（图2）。从冰冻圈功能到冰冻圈服

务，不仅研究视角发生了变化，而且研究对象也从自然界跨越到与人类社会经济的关联方面。

基于冰冻圈服务的形成过程及其对人类福祉的影响过程，以生态系统服务为视角、系统性和可持续性为原则，冰冻圈服务可分为供给、调节、文化、承载和支持五大类型，以及淡水资源供给服务、冷能供给服务等18个亚类[4]。冰冻圈服务与冰冻圈功能之间不只是“一对一”的关系，更多的是“多对一”和“一对多”的关系（图2）。

人类福祉指人类健康、幸福并且物质上富足的生活状态，是一个由多要素组成的多层次体系，具有客观与主观两个内涵。千年生态系统评估（MA）将人类福祉分解为安全、维持高质量生活的基本物质条件、健康、良好的社会关系以及选择与行动的自由5个方面[11]。冰冻圈服务是人类福祉的重要贡献因子，各类冰冻圈服务都或多或少，或直接或间接地对满足人类的生理、经济和精神文化需求带来了一定正面影响。

冰冻圈服务对人类福祉的影响也是一个复杂的过程：① 从冰冻圈服务供给到消费需要金融资本、人力资本、建设资本和社会资本的投入，并受到社会制度、市场调节、技术水平、价值选择等一系列社会学和经济学过程的影响。② 供给与消费之间可能存在空间的分离，因此人类从冰冻圈服务中获得的实际收益与服务供给之间存在着复杂的非线性关系和滞后效应。③ 人类从冰冻圈中获得的收益对人类福祉的贡献也存在边际递减效应，并受人类生活需求状况甚至精神状态的影响[4]。

在全球变暖下，随着冰冻圈加速退缩，虽然短期内一些冰冻圈功能和服务（如水资源供给）将会增强，但从长期趋势看将不断衰退乃至衰竭[4,6]，进而对区域可持续发展和人类福祉产生深远影响。

2.2 案例分析：全球“水塔”和极地系统的冰冻圈功能及其服务

全球高山冰冻圈服务以提供水资源和水文调节服务最为关键，极地冰冻圈则以极地系统对气候调节、原住民生产生活和其他半球乃至全球尺度经济社会影响最为显著。这里以全球高山“水塔”的重要性和极地系统变化为例具体阐述冰冻圈功能和服务变化及其影响。

2.2.1 全球“水塔”的重要性

高山冰冻圈区被誉为“水塔”，用于描述和强调高山冰冻圈在维持下游生产生活和生态用水需求方面发挥的蓄水和供水作用。与其下游地区相比，“水塔”由于地形降水或通过在冰冻圈内储存水及湖泊储量而延迟水的释放，为下游地区提供了稳定的水源。以流域为基础，我们将全球“水塔”划分为78个基本单元，通过从山区“供给侧”——降水量、积雪、冰川和地表水储量4个维度构建供给指数，

图2　冰冻圈服务的形成过程及分类体系[4]

从受影响区“需求侧”——生活需水、工业需水、灌溉需水和自然需水4个维度构建需求指数，利用这些综合指标对“水塔”的重要性进行了评估[10]。

从供给侧看，“水塔”单元供水能力存在相当大的空间差异。在亚洲，青藏高原拥有丰富的冰雪资源，而且高原湖泊中储存了大量的水，大气降水也相对丰富，因此在供水能力上排名最高。在欧洲，北冰洋群岛、冰岛和斯堪的纳维亚半岛的“水塔”中拥有丰富的冰雪储量，特别是冰岛拥有地球上最厚的冰川，冰川储量可观，是其“水塔”区域内年降水量的 15 倍。南美洲安第斯山区供水能力可观，以智利为例，其南部西风带季节性南北波动产生丰沛的地形雨，且冰雪储量大。在北美洲，西北地区和努勒维特、弗雷泽、太平洋和北极海岸是重要的“水塔”单元，其中西北地区和努勒维特的供水能力主要与丰富的冰雪资源以及地表水存储有关。

从需求侧看，灌溉用水需求在各大洲用水类型中都是最高的。亚洲的河流流域，特别是印度河、阿姆河、底格里斯河、恒河、雅鲁藏布江和塔里木河流域，人口稠密，灌溉农业分布广泛，且工业和生活用水需求相对也高；因此，这些区域需水指标最高，对山区水资源依赖性极高，特别当经历不可持续消耗地下水而用于填补巨大用水缺口时，“水塔”单元的供水能力对于满足需求和补给含水层至关重要。

2.2.2 极地系统冰冻圈功能及其服务衰退风险

极地系统变化不但深刻影响当地生态环境和社会经济，而且通过冰冻圈气候调节服务和航道服务等产生半球乃至全球效应。以北极为例，随着全球变暖和冰冻圈退缩，极地系统变化已对当地人类社会经济众多部门产生深远影响，包括商业捕鱼、北极驯鹿放牧、生计系统、旅游业、北极非可再生资源开采、基础设施、交通运输、人体健康和沿海社区等。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）《气候变化中的海洋与冰冻圈变化特别报告》（SROCC）系统评估了气候变化对各部门产生的影响，并提出了适应措施[8,12]。

（1）商业捕鱼。气候变化导致北极鱼类丰度和分布发生不同程度的改变，海洋生态系统变化对渔业生产力产生影响。应开展资源本底评估，解决权益问题，基于监测、研究和公众参与决策，开展适应性管理等。

（2）生计系统。气候变暖导致北极地区食物分布和丰度发生变化，另外交通可达性和交通安全，以及粮食生产、储存和质量均受影响。应建立适应性管理系统，包括灵活调配食物种类、获取方式和时间，动员公众参与决策，保证生产权等。

（3）驯鹿放牧。雨浇雪事件①导致鹿群高死亡率，苔原牧场的灌丛化降低了草料质量等。应改变牧民活动方式，制定较为自由的放牧政策，确保土地使用权，加强食物补给等。

（4）旅游业。全球变暖环境下不断形成开阔水域，对旅游业带来机遇，公众试图抓住“最后”旅游机会。应鼓励和放宽极地旅游，增加游客人数，提升旅游服务质量，同时制定政策确保旅游安全、文化完整和生态健康。

（5）北极非可再生资源开采。随着海冰和冰川减退，带来一些新的开采和发展机遇，但极端水文事件和冻土退化等对生产和基础设施产生了一定影响。应采取的适应性措施包括：开展气候变化情景分析、优化开发方式等。

（6）聚居区基础设施。多年冻土退化影响地基稳定性，海岸遭受侵蚀。应开发新技术以适应冻土融

① 雨浇雪 (rain-on-snow) 是发生在高纬度或高海拔特定地区降水以液态形式落到地面积雪上的事件，其形成与气温、降水形态和积雪范围和厚度密切相关。较暖的气候背景下虽然积雪范围减小、厚度变薄，但液态降水频率增加，导致雨浇雪事件发生频率也在增加。雨浇雪事件可对区域气候系统、生态系统和人类生产生活产生重要影响。

沉，必要时要进行居民区搬迁。

（7）海上运输。虽然新增水域可以容纳更多船只，商业获益增加，但随着运输繁忙，也可能对生态和环境造成负面影响。应在增加船只和扩大旅游业的同时增强对危险性废弃物、溢油和安全事故的应急与管控能力。

（8）人体健康。北极系统变化将导致食物安全和居民身心健康遭受影响。应加强食物安全研究，投入人力和财政资源支持公共项目，提高社会应对健康问题的意识。

极地系统变化影响的溢出效应还将波及极地以外地区，甚至具有全球影响。主要有：极地冰冻圈（主要是冰盖和冰川）对水的固持功能减退，导致全球海平面上升；多年冻土碳固持功能下降，加剧温室效应增暖风险；极地变化使极地大气环流趋于紊乱和能量外溢，导致其影响区域极端天气气候事件更加频发。这些大尺度影响，只能通过全球共同减排和保护气候的行动加以减缓和适应。

3 冰冻圈服务价值化和估算

冰冻圈服务价值化是衡量人类从冰冻圈得到的所有惠益的一种重要手段，是冰冻圈经济学的重要组成部分，其核算关系到对冰冻圈资源供给、流通和消费的综合描述。服务价值化也是改善决策的重要基础。例如，一个有效的冰冻圈保护和社会经济协调发展决策需要对冰冻圈服务进行定量表述，进而对各种需求进行综合平衡，以达到环境和社会效益的极大化。

冰冻圈服务可以体现在其产出价值，表述为特定时间和空间尺度内对人类提供惠益的价值总和，即总经济价值（TEV）。类似于生态服务，冰冻圈服务惠益属性可以有许多种（图3），可以将总经济价值分为使用价值（UV）和非使用价值（NUV）。使用价值是指人类为了满足消费或生产目的而使用的冰冻圈服务所产生的价值，这些服务在当前可以被直接或间接地使用，或者是在未来可以提供潜在使用价值。使用价值包括直接使用价值（DUV）、间接使用价值（IUV）和选择价值（OV）。非使用价值是指人们在知道某种冰冻圈资源的存在（即使永远不会被使用）确定的价值，包括遗产价值（PV）和存在价值（EV）。

冰冻圈服务价值评估与生态系统服务具有相似性。针对冰冻圈服务特点，参考生态系统服务价值评估方法，冰冻圈服务价值体系如表1所示[3]。在估算中，主观影响带来的不确定性，使冰冻圈价值的合理评估成为一个亟待解决的问题。近期研究越来越趋向于采取分离冰冻圈资源价值和冰冻圈服务价值，并认为冰冻圈服务价值是由冰冻圈资源投入到社会经济系统中而实现的。冰冻圈淡水资源价值通常可以利用市场价值法（MPM）来评估，但服务价值体现在由其服务产生的社会经济效益。冰冻圈服务价值将同时取决于资源供给和服务需求2个方面。

4 冰冻圈及其影响区社会-生态系统恢复力建设

4.1 全球变暖背景下冰冻圈不可逆变化将首当其冲

工业革命以来，人类活动对气候及生态系统造成全球性影响，地球系统不断走出全新世有规律的冰期-间冰期旋回，进入了“人类世”新纪元。如果未来人类排放温室气体继续加剧，生态系统将持续退化，最终很可能致使地球系统越过行星边界而走向“热室地

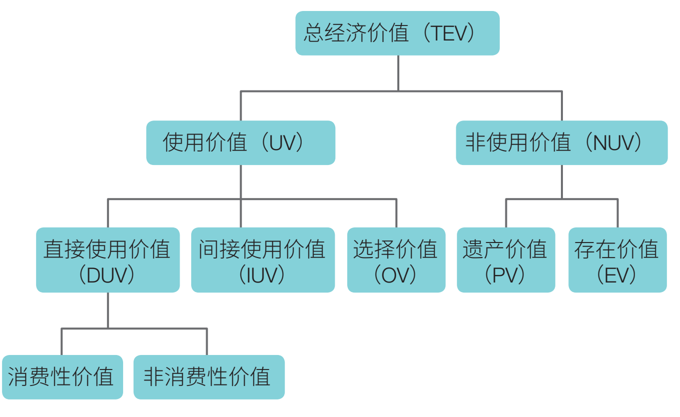


图3　冰冻圈服务价值的构成

表 1　典型冰冻圈服务价值评估方法[3]

冰冻圈服务		价值评估方法			评估难度
		直接使用价值	间接使用价值	非使用价值	
供给服务	淡水资源	MPM			较易
调节服务	气候调节		RCM、WTP、HPM		难
	径流调节		SEM		难
	水源涵养与生态调节		SEM、RCM、MPM		难
文化服务	美学观赏与游憩服务			WTP、TCM	较难
	科研研究与环境教育			RCM、CAM	较难
	宗教精神与文化结构			RCM、WTP	较难
支持服务	生境服务	OCM、CVM			较难
	清洁能源	RCM			较难

MPM，市场价值法（Market Price Method）；RCM，替代费用法或替代成本法（Replacement Cost Method）；WTP，支付意愿法（Wish To Pay）；HPM，享受价值法或享乐价格法（Hedonic Price Method）；SEM，影子工程法（Shadow Engineering Method）；TCM，旅行费用法（Travel Cost Method）；CAM，费用分析法（Cost Analysis Method）；OCM，机会成本法（Opportunity Cost Method）；CVM，条件价值法（Contingent Valuation Method）

球”（图 4）。

随着地球系统进入人类世，在地球系统中有诸多子系统正在趋向达到某一阈值而发生状态的不可逆迁移，难以从当前状态回到以前，可能导致严重负面后果。这类子系统被称为不可逆要素，亦称临界要素（tipping elements）。当前，因为全球变暖而显现出的临界要素及其临界点（tipping point）正在逐步显现[13,14]（图 4）。

由于冰冻圈对气候变暖高度敏感，当前显现出的众多临界要素中，大多数与冰冻圈密切相关，包括北极海冰、格陵兰冰盖、南极冰盖、多年冻土和高山冰川等。冰冻圈临界要素与其他要素相比更容易达到临界点，甚至有可能在 1.5℃ 和 2.0℃ 温升目标内就发生逆转。IPCC 于 2018 年发布了《1.5℃ 温升特别报告（SR 15）》。报告关注了全球温升 1.5℃ 和 2℃ 情景下 10 个临界要素的变化风险，包括北极海冰、苔原、多年冻土、亚洲季风、西非季风和萨赫勒地区、雨林、北方针叶林、热浪与人体健康、关键农作物系统、热带亚热带牧业系统等。这些临界要素中有 6 个

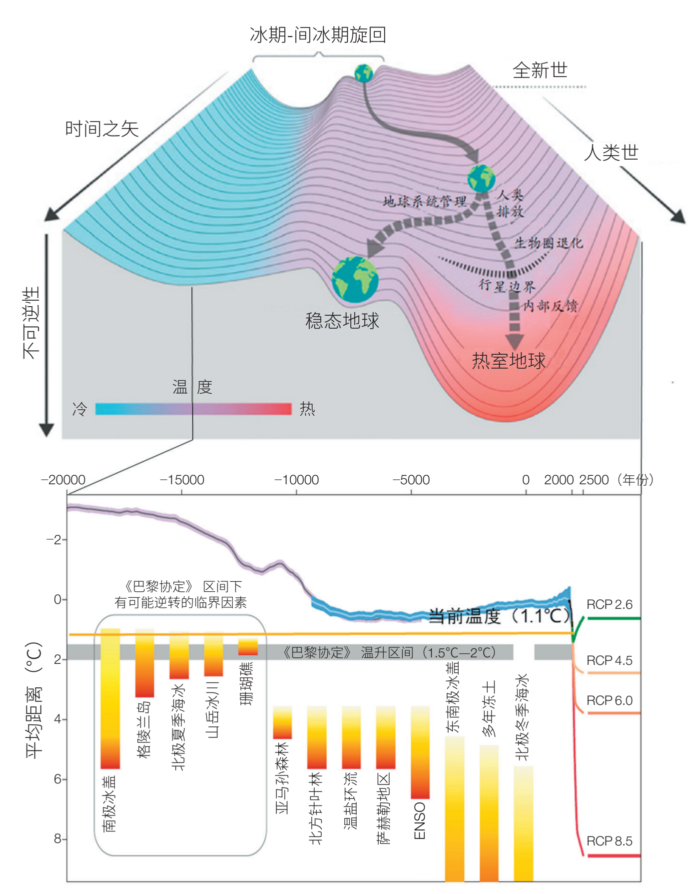


图 4　全球变暖引发的地球系统演化轨迹及其主要临界要素，根据文献 [14,15] 修改

横坐标负值表示公元前；RCP（Representative Concentration Pathway）即典型浓度路径

与冰冻圈直接相关[15,16]，级联相关的临界要素则更多。冰冻圈临界要素如若发生逆转，势必引起冰冻圈功能及其服务的衰退甚至丧失，潜在的冰冻圈临界要素不可逆变化将成为社会-生态系统和人类福祉的巨大威胁。

4.2 冰冻圈及其影响区社会-生态系统恢复力路径

在全球变化背景下，冰冻圈快速变化已对局地和区域乃至全球社会-生态系统产生了广泛而深刻的负面影响，主要体现在对冰雪旅游业系统、寒区畜牧业系统、干旱区绿洲农业系统、冰冻圈灾害承灾区系统、寒区重大工程、海岸和海岛国家安全、极地栖息地系统等的综合影响。

加强冰冻圈及其影响区社会-生态系统恢复力建设是应对冰冻圈功能及其服务衰退挑战并实现区域可持续发展的重要途径②。社会-生态系统恢复力建设以降低脆弱性为总目标，从系统科学视角维持和培育系统应对外界胁迫而保持稳定性的能力，为环境问题的政策制定和管理提供了一个非常实用的框架[17]。IPCC第五次气候变化评估报告将“气候恢复力路径”定义为：通过将适应和减缓相结合减轻气候变化及其影响的可持续发展轨迹[18]，这一定义不仅将恢复力与可持续性动态路径有效连接，而且强调了适应和减缓在气候恢复力建设中的作用[17]。冰冻圈及其影响区域的社会-生态恢复力建设也要将减缓和适应有机结合，以共同应对冰冻圈变化以及其他外界压力对区域社会-生态系统的影响②。

（1）由于冰冻圈的气候依赖性，减缓全球气候变暖是维持冰冻圈功能健康、保障冰冻圈服务持续稳定供给、减轻冰冻圈灾害风险、增强冰冻圈及其影响区恢复力的根本途径。如果将冰冻圈在全球变暖下的临界值和冰冻圈服务的有效供给能力考虑在内，实际上我们需要拿出比《巴黎协定》更强有力的温室气体减排行动。

（2）在全球持续变暖、大多数冰冻圈要素发生不可逆变化的背景下，适应将是目前应对冰冻圈变化及其影响、提升冰冻圈影响区恢复力的主要途径。在大多数受冰冻圈影响的地区，自然环境脆弱，社会经济水平相对较低。国际和国家层面应该筹措更多的资金加强冰冻圈及其影响区域的适应能力，包括发展当地经济和教育、改善基础设施、移民搬迁等。

（3）建立稳健的冰冻圈及其影响区社会-生态系统监测、评估、预警和决策系统将是加强恢复力建设的基础和关键，当前已迫在眉睫。具体方案和流程应该包括：① 基于定位观测、遥感和模型模拟等手段，定期开展冰冻圈变化评估，包括当前状态和预期的未来变化；② 通过社会经济统计、实地调查和参与性访谈，摸清冰冻圈及其影响区域暴露度和脆弱性动态；③ 耦合冰冻圈变化和区域社会-生态系统动态，进一步评估并发现问题，从而提供更明晰的系统演化信息，包括准确的早期预警等；④ 通过不同利益相关者之间的参与对话，探讨加强恢复力建设的潜在解决方案；⑤ 综合评估不同方案的成本和后果，从而做出更合理的规划和决策；⑥ 持续监测和评估系统动态，包括解决方案的实施情况，当有更好的解决方案时不断调整原有计划。

5 结语

人类社会的发展历程与获取大自然的惠益密不可分，作为自然系统的一部分，冰冻圈与人类社会息息相关。分析冰冻圈功能及其服务是理解全球和区域人文社会及其发展的重要途径，是人类合理应对气候变化影响、可持续利用冰冻圈资源的基础。本文力图从基本概念的建立、理论框架的发展到实践应用，架设冰冻圈自然属性与社会人文属性之间的桥梁，阐明冰

② 苏勃，效存德．冰冻圈影响区恢复力研究和实践：进展与展望．气候变化研究进展，2020（外审）.

冻圈的社会经济效应，特别是气候变化背景下对社会发展的种种冲击，唤醒危机意识。当然，我们的认识尚不全面，今后需在不断深化研究的过程中加以完善。

未来更系统地研究还应包括以下 6 个方面：① 冰冻圈在人文社会中的服务作用；② 冰冻圈功能、服务与人类福祉的关系；③ 冰冻圈资产评估与价值化以及冰冻圈经济学；④ 冰冻圈功能与服务区划，冰冻圈各类服务的权衡与协同关系；⑤ 冰冻圈影响区恢复力建设和可持续发展；⑥ 冰冻圈地缘政治。冰冻圈人文社会学的深化研究和日臻成熟，必将更好地服务于可持续发展，造福全人类。

参考文献

1 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2017.

2 Qin D H, Ding Y J, Xiao C D, et al. Cryospheric science: Research framework and disciplinary system. National Science Review, 2018, 5(2): 255-268.

3 Xiao C D, Wang S J, Qin D H. A preliminary study of cryosphere service function and value evaluation. Advances in Climate Change Research, 2015, 6(3-4): 181-187.

4 Su B, Xiao C, Chen D, et al. Cryosphere services and human well-being. Sustainability, 2019, 11(16): 4365.

5 Wang X, Liu S W, Zhang J L. A new look at roles of the cryosphere in sustainable development. Advances in Climate Change Research, 2019, 10(2): 124-131.

6 效存德, 苏勃, 王晓明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险. 科学通报, 2019, 64(19): 1975-1984.

7 王世金, 效存德. 全球冰冻圈灾害高风险区: 影响与态势. 科学通报, 2019, 64(9): 891-901.

8 IPCC. Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. [2019-09-20]. https://archive.ipcc.ch/srocc/.

9 王晓明, 张靖琳, 刘世伟, 等. "亚洲水塔"在高亚地区的社会经济作用. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1332-1340.

10 Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature, 2020, 577: 364-369.

11 Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Current State And Trends. Washing DC: Island Press, 2005.

12 效存德, 苏勃, 窦挺峰, 等. 极地系统变化及其影响与适应新认识. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 153-162.

13 Steffen W, Rockström J, Richardson K, et al. Trajectories of the Earth System in the anthropocene. PNAS, 2018, 115(33): 8252-8259.

14 Schellnhuber H J. Tipping elements in the Earth System. PNAS, 2009, 106: 20561-20563.

15 IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5℃. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

16 苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 395-404.

17 陈德亮, 秦大河, 效存德, 等. 气候恢复力及其在极端天气气候灾害管理中的应用. 气候变化研究进展, 2019, 15(2): 167-177.

18 IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

Key Viewpoint of Cryospheric Human-sociology: Function and Service

XIAO Cunde[1*] WANG Xiaoming[2] SU Bo[1]

（1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China）

Abstract The cryosphere is closely related to human society. As a result of climate warming and corresponding cryosphere shrinkage, the cryosphere functions (CFs) and their associated services and hazards are undergoing profound changes. On the one hand, the cryosphere hazards become more and more frequent with heavily extreme events; on the other hand, the overall cryospheric service (CS) capacity has been deteriorating and would continue or be eventually lost. This article introduced the concepts of CFs, CSs, and their value on the basis of summarizing the human and social characteristics of the cryosphere and its affected areas. Then, taking the importance of world's "water towers" and changes in polar systems as examples, we illustrated the changes in CSs and their impact. Finally, the resilient pathway of cryosphere-affected socio-ecological systems was further discussed.

Keywords cryospheric human-sociology, cryospheric functions, cryospheric services, water tower, polar system, service valuation, resilience



效存德 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室主任、教授、博士生导师。主要从事冰冻圈与全球变化、冰冻圈功能及其服务研究。曾任国际冰冻圈科学学会（IACS）副主席，现任世界气象组织（WMO）极地与高山观测、研究和服务指导委员会（EC-PHORS）委员、中国冰冻圈科学学会（筹）秘书长、中国科学探险协会副主席、IPCC AR6 第一工作组第九章首席作者（CLA）等，以及 *International Journal of Disaster Risk Science* 和 *Advances in Climate Change Research* 等杂志编委。主持国家重点研发计划、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重大项目课题多项。发表论文250余篇。E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

XIAO Cunde Professor and Director at State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University (BNU). His research interests focus on cryosphere and global changes, cryosphere functions and their services. He used to serve as Vice-President of International Association of Cryospheric Science (IACS), and now is a member of WMO Expert Committee of Polar and High Mountain Observation, Research and Services (EC-PHORS), the Coordinate Leading Author (CLA) of Working Group One (WG1) of IPCC Sixth Assessment Report (AR6), the Secretary-General of China Society of Cryospheric Science, and the editorial board of many journals such as *International Journal of Disaster Risk Science* and *Advances in Climate Change Research*. He is also the Principal Investigator (PI) of the National Key R&D Program of China, the Assistant PI of the National Fundamental Research Development Plan Project of China, and the National Natural Science Foundation of China. He has completed and published more than 250 papers. E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

* Corresponding author

■责任编辑：张帆